

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В.Н. Каразіна**

**Третяк Красимир Костянтинович**



УДК 533.951

**НАГРІВ І ДІАГНОСТИКА ПЛАЗМИ ТОРОЇДАЛЬНИХ  
ПАСТОК КОРОТКОХВИЛЬОВИМИ  
ВИСОКОЧАСТОТНИМИ ПОЛЯМИ**

01.04.08 – фізика плазми

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі прикладної фізики та фізики плазми фізико-технічного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна МОН України та в Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

**Науковий керівник:** доктор фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник,  
**Греков Дмитро Леонідович,**  
Інститут фізики плазми Національного наукового центру  
«Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,  
м. Харків, завідувач відділу теорії плазми.

**Офіційні опоненти:** доктор фіз.-мат. наук, професор  
**Білецький Микола Миколайович,**  
Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова  
НАН України, м. Харків, завідувач відділу твердотільної  
електроніки;

кандидат фіз.-мат. наук,  
**Момот Андрій Іванович,**  
Київський національний університет імені Тараса  
Шевченка, м. Київ, доцент кафедри фізики  
функціональних матеріалів.

Захист дисертації відбудеться “24” березня 2017 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна МОН України за адресою: 61108, м. Харків, пр. Курчатова, 31, ауд. 301.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна МОН України за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий “21” лютого 2017 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої  
ради Д64.051.12



С.О. Письменецький

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дисертаційна робота присвячена теоретичному дослідженню нагріву і діагностики плазми короткохвильовими високочастотними полями в сучасних тороїдальних пастках. Довжина хвилі таких полів в плазмі значно менша характерних масштабів неоднорідності параметрів плазми. Актуальність теми дисертації визначається тим, що нагрівання плазми високочастотними (ВЧ) електромагнітними хвилями, поряд з нагріванням пучками нейтральних атомів, широко застосовується в дослідженнях з керованого термоядерного синтезу в системах з магнітним утриманням плазми. Одним із ретельно досліджених та широко використовуваних методів нагріву є іонний циклотронний нагрів (ІЦН) плазми за допомогою швидких магнітозвукових хвиль, який успішно застосовується на найбільших термоядерних установках, таких як токамаки JET (Калхем, Великобританія), ASDEX-Upgrade (Гархінг, Німеччина), NSTX-U (Принстон, США), стелларатор LHD (Токі, Японія). Найближчим часом його планують використовувати на найбільшому стеллараторі Wendelstein 7-X (Грайфсвальд, Німеччина). Цей метод традиційно застосовується для створення і нагріву плазми на торсатронах «Ураган» (Харків, Україна). Введення ВЧ енергії в плазму торсатронів здійснюється за допомогою рамкової неекранованої антени (також званою Nagoya Type-III), яка була запропонована і розроблена співробітником УФТІ О.М. Швецем. Вивчення ІЦН плазми із застосуванням рамкової антени в установці «Ураган-3М» раніше проводилося з використанням моделі одновимірно неоднорідного плазмового циліндра. При цьому вплив складної тривимірної геометрії торсатрона на поширення і поглинання хвиль в плазмі не враховувався. Нез'ясованою була і роль безпосередньо збуджуваної антеною повільної хвилі в нагріванні плазми. Проведене в дисертації дослідження цих питань є актуальним ще й з тієї причини, що короткохвильова повільна мода відіграє важливу роль в ICWC (Ion cyclotron wall conditioning – межімпульсний високочастотний розряд для чищення камери), який є ефективним інструментом оптимізації основного розряду шляхом видалення домішок зі стінок камери.

Поряд зі створенням та нагріванням плазми, настільки ж важливим є питання про визначення параметрів плазми. Практично на всіх тороїдальних установках з магнітним утриманням плазми зараз застосовуються діагностики, засновані на взаємодії електромагнітних хвиль надвисокочастотного (НВЧ) діапазону з плазмою. Це, перш за все, рефлектометрія, тобто визначення параметрів плазми за допомогою відбитих хвиль. Рефлектометрія з використанням звичайної хвилі широко застосовується як для визначення профілю густини плазми, так і для дослідження флуктуацій густини плазми. Для цього методу діагностики добре розвинена інструментальна база і методи обробки даних вимірювань. Однак, потенціал рефлектометрії використовується далеко не повною мірою. Зокрема, практично не застосовується рефлектометрія з використанням незвичайної хвилі. Показник заломлення цієї хвилі залежить не тільки від густини плазми, але і від величини утримуючого магнітного поля. Як наслідок, дані вимірювань пов'язані з розподілом параметрів плазми нелінійним інтегральним рівнянням, яке не має

аналітичного розв'язку. Це ускладнює відновлення параметрів плазми за даними вимірів. Для вирішення цього завдання в дисертації було розроблено нові ітераційні алгоритми розв'язання інтегральних рівнянь для звичайної і незвичайної хвиль. Ці алгоритми дозволили використовувати обидва типи хвиль в рефлектометрії плазми та запропонувати нові методи діагностики, засновані на одночасному використанні звичайної і незвичайної хвиль. Розробка таких діагностик для стелараторів та сферичних токамаків є досить актуальною, оскільки як стеларатори, так і сферичні тори розглядаються в якості перспективних систем для демонстраційного реактора DEMO.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертацію виконано на кафедрі прикладної фізики та фізики плазми фізико-технічного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України та в Інституті фізики плазми Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України. Обраний напрям досліджень дисертаційної роботи є частиною фундаментальних науково-дослідних робіт, які виконувались за наступними держбюджетними темами: «Теорія утримання і нагрівання плазми в магнітних пастках керованого термоядерного синтезу і у високочастотних розрядах пристроїв плазмових технологій» (№ державної реєстрації 0111U006907); «Теорія взаємодії електромагнітних полів з плазмою та явищ переносу в тороїдальній, неідеальній та заряджених плазмах» (№ державної реєстрації 0116U001991); «Удосконалення нових методів надвисокочастотної діагностики плазми, заснованих на використанні двохполяризаційної інтерферометрії та багаточастотної рефлектометрії» (№ державної реєстрації 0113U006195); «Діагностичне забезпечення виконання програми досліджень нагріву та утримання плазми на стелараторах Ураган-2М та Ураган-3М» (№ державної реєстрації 0115U003831); «Поширення ґрид-технологій для розрахунків з фізики плазми та створення віртуальної організації Plasma» (№ державної реєстрації 0113U002957). У зазначених роботах дисертант брав участь у якості виконавця.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є дослідження впливу тривимірної неоднорідності параметрів плазми на розповсюдження і поглинання короткохвильових електромагнітних полів в плазмі та розробка нових методів діагностики плазми високочастотними полями, заснованих на одночасному використанні звичайної та незвичайної хвиль.

Для досягнення цієї мети необхідно було розв'язати **наступні задачі**:

- 1) дослідити особливості високочастотного нагріву плазми торсатрона «Ураган-3М» в області іонно-циклотронних частот з урахуванням впливу тривимірної конфігурації плазмового шнура на розподіл електромагнітних полів в плазмі;
- 2) розробити спеціальні ітераційні алгоритми розв'язання інтегральних рівнянь для звичайної і незвичайної хвиль;
- 3) визначити перспективи застосування двохполяризаційної рефлектометрії в торсатроні «Ураган-2М»;
- 4) вивчити можливість використання двохполяризаційної рефлектометрії для відновлення профілю полоїдального магнітного поля в сферичних токамаках.

*Об'єктом дослідження* є розподіли зовнішніх високочастотних електромагнітних полів в тороїдальних магнітних пастках.

*Предметом дослідження* є поширення та поглинання короткохвильових електромагнітних полів в стелараторах і токамаках.

*Методи дослідження.* Методи досягнення поставленої мети включають в себе як аналітичні, так і числові методи. За допомогою методу променевих траєкторій досліджено особливості поширення та поглинання повільної хвилі в торсатроні «Ураган-3М». Наближення геометричної оптики застосовувалося при отриманні інтегральних рівнянь, які пов'язують зсув фази зондуючих хвиль з розподілом параметрів плазми. Для розв'язання цих інтегральних рівнянь застосовано оригінальний ітераційний алгоритм. Використання наближених методів розв'язання рівнянь Максвелла дозволило провести якісний аналіз процесів, що відбуваються при нагріванні плазми торсатрону високочастотними полями.

**Наукова новизна роботи** полягає в тому, що в ній **уперше:**

1) показано визначальний вплив тривимірної неоднорідності параметрів плазми торсатрона «Ураган-3М» на поширення та поглинання швидкої хвилі; встановлено, що просторова близькість зон альфвенівського і циклотронного резонансів приводить до зміни поляризації швидкої хвилі в області циклотронного резонансу; наслідком цього є циклотронне поглинання швидкої хвилі на іонах, що підтверджено експериментально;

2) з'ясовано, що повільна хвиля поширюється тільки на периферії плазмового шнура торсатрона «Ураган-3М»; показано, що вся потужність, яку випромінює рамкова антена за допомогою повільної хвилі, поглинається поблизу антени за рахунок поглинання Ландау на електронах та за рахунок зіткнень;

3) розроблено ітераційні алгоритми чисельного розв'язання інтегральних рівнянь, які пов'язують зсуви фаз зондуючих плазму звичайної і незвичайної хвиль з просторовими розподілами параметрів плазми;

4) показано, що застосування двохполяризаційної рефлектометрії для визначення профілю густини плазми в торсатроні «Ураган-2М» істотно розширює діапазон вимірюваної густини при використанні багатоканального рефлектометра з фіксованим набором частот;

5) запропоновано та теоретично обґрунтовано новий метод вимірювання профілю полоїдального магнітного поля в сферичних токамаках, в якому для зондування плазми одночасно використовуються звичайна і незвичайна хвилі.

**Практичне значення здобутих результатів.** Практична цінність проведеного в дисертації дослідження визначається тим, що отримані шляхом чисельного моделювання дані про поширення повільної хвилі та розташування зон альфвенівського резонансу були застосовані для аналізу результатів експериментів по ВЧ нагріванню тороїдальної плазми в області іонно-циклотронних частот на установці «Ураган-3М». Отримані в дисертації результати дослідження прояснили вплив тривимірної конфігурації параметрів плазми на її нагрівання в торсатроні «Ураган-3М» за допомогою рамкової та трьохнапіввиткової антен. Розроблений і створений автором модульний променевий код може бути застосований для розрахунків поширення та

поглинання короткохвильових полів в інших сучасних тороїдальних термоядерних пастках. Запропоновано нові методи діагностики плазми, засновані на використанні двохполяризаційної рефлектометрії. Розроблено ефективні ітераційні алгоритми, які можуть застосовуватися для розв'язання зворотних задач діагностики плазми.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, що увійшли до дисертації, здобуто за особистої участі автора. Особистий внесок здобувача в опублікованих роботах [1-11] полягає в розв'язанні сформульованих задач, проведенні числових розрахунків та комп'ютерного моделювання, аналізі літературних джерел, спільному зі співавторами аналізі здобутих результатів, їх підготовці до публікації, написанні статей та презентації доповідей за темою дисертації.

У роботах [1, 6] здобувач брав безпосередню участь у дослідженні високочастотного нагрівання тороїдальної плазми в області іонно-циклотронних частот на установці «Ураган-3М» та виконав розрахунки положень альфвенівських резонансів, областей поширення швидкої магнітозвукової та швидкої альфвенівської хвиль, областей іонного циклотронного резонансу.

Робота [2] виконана без співавторів, здобувачем особисто розроблено спеціальні ітераційні алгоритми розв'язання інтегральних рівнянь для звичайної і незвичайної хвилі, проведено числові розрахунки.

У роботах [3, 7] здобувачем уперше досліджено новий метод визначення профілю полоїдального магнітного поля для сферичних токамаків, який базується на одночасному використанні як звичайної, так і незвичайної хвиль.

У роботах [4, 8, 9] здобувач узяв безпосередню участь у дослідженні метода двохполяризаційної рефлектометрії для визначення профілю густини плазми в торсатроні «Ураган-2М» та особисто провів комп'ютерне моделювання.

У роботах [5, 10, 11] здобувач самостійно розробив модульний променевий код та здійснив комп'ютерне моделювання поширення та поглинання повільної хвилі в тороїдальній плазмі торсатрона «Ураган-3М» в іонному циклотронному діапазоні частот.

**Апробація результатів дослідження.** Основні результати дослідження доповідались та здобули позитивну оцінку на наступних міжнародних конференціях та літніх школах: Ukrainian Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kiev, Ukraine, 24-25 September, 2013) [6]; 26th Symposium on Plasma Physics and Technology (Prague, Czech Republic, 16-19 June, 2014) [7]; International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kharkiv, Ukraine, 15-18 September, 2014) [8]; Ukrainian Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kiev, Ukraine, 22-23 September, 2015) [9]; 13th Kudowa Summer School “Towards Fusion Energy” (Kudowa-Zdrój, Poland, 13-17 June, 2016) [10]; International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kharkiv, Ukraine, 12-15 September, 2016) [11].

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 5 статей у наукових фахових виданнях [1-5], які задовольняють чинним вимогам ДАК МОН України до публікацій. З них 1 стаття [4] опублікована у спеціалізованому фаховому науковому виданні України та 4 статті [1, 2, 3, 5] у спеціалізованих наукових виданнях іноземних держав, які включено до міжнародної наукометричної бази

Scopus. 6 робіт, які додатково розкривають зміст дисертації, опубліковано у збірниках наукових праць, у матеріалах і тезах доповідей на наукових конференціях [6-11].

**Структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів основного тексту з 48 рисунками, висновків та списку використаних джерел із 171 найменування. Повний обсяг дисертації складає 147 сторінок, у тому числі список використаних літературних джерел займає 21 сторінку.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено об'єкт та предмет дослідження, мету й завдання дисертації, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами та темами, визначено наукову новизну результатів і можливості їхнього практичного використання, наведено кількість публікацій за темою дисертації, визначено особистий внесок здобувача в опублікованих разом зі співавторами наукових працях, представлено відомості про апробацію результатів, описано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** наведено стислий огляд літературних джерел за темою дисертації та окреслено коло питань, які розглядаються в роботі.

**Другий розділ** присвячено теоретичному дослідженню високочастотного нагріву плазми торсатрона «Ураган-3М» за допомогою швидких та повільних електромагнітних хвиль в іонному циклотронному діапазоні частот. Той факт, що магнітні поверхні торсатрона «Ураган-3М» мають складну геометрію, а для параметрів плазми і магнітного поля характерна тривимірна неоднорідність, робить неможливим опис поширення і поглинання хвиль в плазмі аналітично і істотно ускладнює розв'язання задачі за допомогою чисельних методів.

Повільна хвиля за своєю природою є короткохвильовою модою, на відміну від швидкої хвилі, тому для її дослідження був застосований метод променевих траєкторій. При розрахунках променевих траєкторій використовувалося дисперсійне рівняння другого порядку  $N_{\perp s}^2 = -\varepsilon_3(N_{\parallel}^2 - \varepsilon_1)/\varepsilon_1$ , що описує поширення повільної хвилі в магнітоактивній плазмі. Компоненти тензора діелектричної проникності  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  визначалися формулами, отриманими в МГД наближенні. Для компоненти  $\varepsilon_3$  використовувався кінетичний вираз в зв'язку з тим, що для характерних параметрів периферійної плазми «Ураган-3М» ( $T_e \sim 50$  eV,  $n = 10^{10}$  см<sup>-3</sup>) величина  $z_e = \omega / \sqrt{2} k_{\parallel} v_{Te} \geq 1$ . При розрахунку поглиненої потужності уздовж траєкторії враховувалося загасання Ландау на електронах, циклотронне поглинання на іонах та загасання за рахунок зіткнень. При обчисленні уявної частини показника заломлення  $\text{Im} N$  використані уявні поправки до компонент  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  були отримані з кінетичної теорії. За допомогою розробленого променевого коду *RayU3* побудовано якісну теорію поширення

повільних хвиль, що збуджуються рамковою антеною<sup>1</sup> (РА), в неоднорідній плазмі торсатрона.

Показано, що повільна хвиля поширюється на периферії плазмового шнура і не проникає в глиб плазми. Поглинання відбувається переважно за рахунок загасання Ландау на електронах, проте в разі холодної плазми з невисокою густиною істотним є загасання за рахунок зіткнень. На рис. 1 зображено проекції променевих траєкторій повільної хвилі в D-D перерізі торсатрона для плазми з наступними параметрами:  $n_0 = 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_b = 10^8 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_0 \sim 15 \text{ eV}$ ,  $T_b \sim 3 \text{ eV}$ . Траєкторії, відзначені пунктиром, відповідають розрахункам, в яких не враховувалося загасання за рахунок зіткнень.

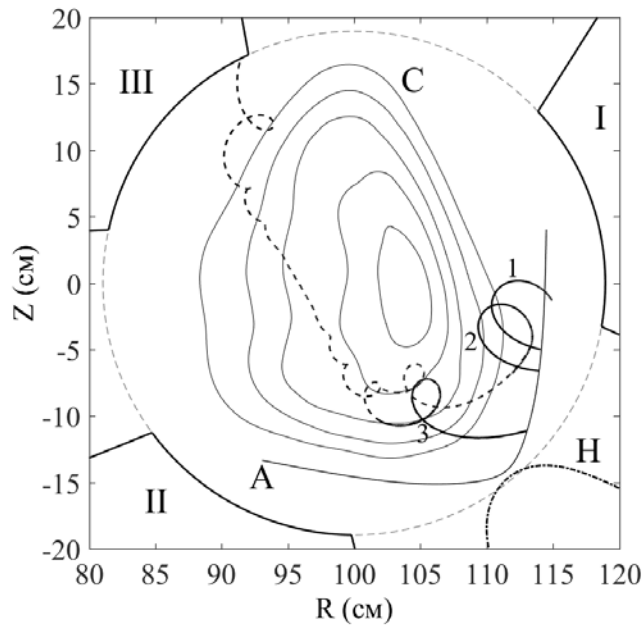


Рис. 1. Проекції променевих траєкторій 1-3 повільної хвилі на малий переріз тору; С – магнітні поверхні, А – схематичне відображення РА, Н – іонний циклотронний резонанс, I-III – гвинтові провідники, пунктирні лінії – продовження траєкторій 2 та 3 без урахування загасання за рахунок зіткнень.

Дослідження швидкої магнітозвукової хвилі (при  $\omega > \omega_{ci}$ ) та швидкої альфвенівської хвилі (при  $\omega < \omega_{ci}$ ), що збуджуються азимутними струмами трьохнапіввиткової (ТНВА) антени на периферії плазми, проводилося на основі двовимірних розрахунків областей поширення ( $N_{\perp F}^2 > 0$ , де  $N_{\perp F}^2 = ((\epsilon_1 - N_{\parallel}^2)^2 - \epsilon_2^2) / (\epsilon_1 - N_{\parallel}^2)$  – дисперсійне рівняння швидкої хвилі) та зон конверсії ( $N_{\parallel}^2 = \epsilon_1$ ) швидкої хвилі при фіксованому поздовжньому показнику

<sup>1</sup> RF production and heating of plasma in Uragan-3 torsatron / O.M. Shvets, A.G. Dikii, S.S. Kalinichenko, et al. // Proc. 4th International Symp. on Heating in Toroidal Plasmas (Rome, 1984). – Vol. 1. – 1984. – p. 513.



заломлення  $N_{\parallel} \approx cl/\omega R$ , а також оцінок, виконаних з використанням параметрів експериментів і розрахунків магнітного поля за законом Біо-Савара. На рис. 2 та 3

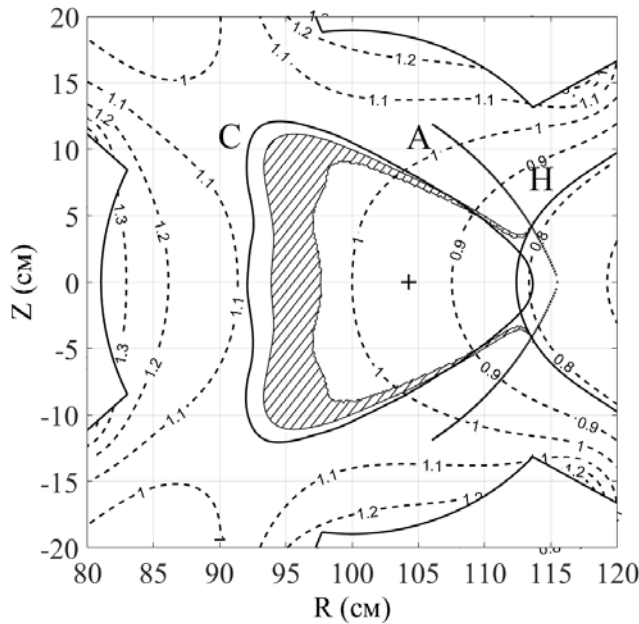


Рис. 2. Заштрихована область – зона розповсюдження швидкої хвилі; С – остання замкнена магнітна поверхня, А – схематичне відображення ТНВА, Н – іонний циклотронний резонанс, пунктирні лінії – нормований модуль напруженості магнітного поля;

$$n_0 = 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}.$$

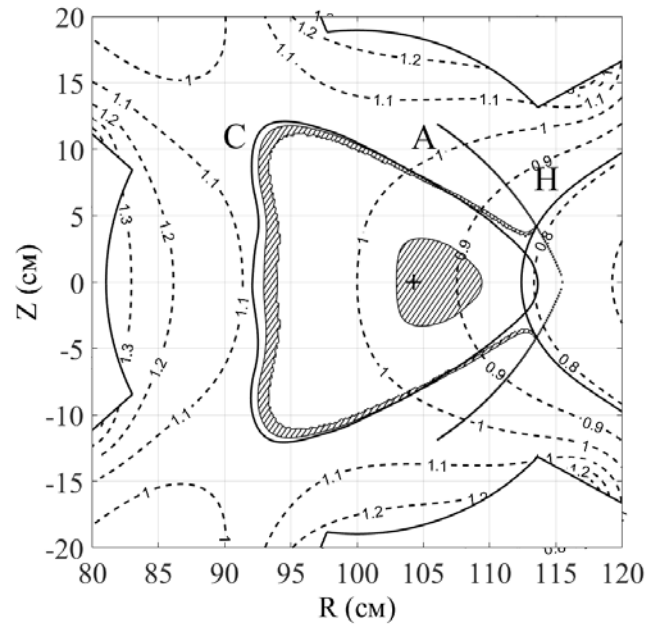


Рис. 3. Заштрихована область – зона розповсюдження швидкої хвилі; С – остання замкнена магнітна поверхня, А – схематичне відображення ТНВА, Н – іонний циклотронний резонанс, пунктирні лінії – нормований модуль напруженості магнітного поля;

$$n_0 = 1.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}.$$

представлено розраховані області поширення швидкої хвилі для різних значень густини плазми в центрі для тороїдальної гармоніки  $l = 10$ . З рис. 2 та 3 видно, що з зростанням густини плазми область поширення швидкої хвилі звужується і зміщується на периферію. При цьому в центрі плазми з'являється інша область поширення слабо загасаючої швидкої магнітозвукової хвилі. Зони альфвенівського резонансу знаходяться на внутрішній межі заштрихованих областей та з підвищенням густини зміщуються в область плазми з меншою густиною. Це знижує ефективність нагріву та зумовлює обмеження максимальної густини плазми, що створюється цим високочастотним методом нагріву. Також показано, що область іонного циклотронного резонансу (див. рис. 4), ширина якої визначається з умови  $(\omega - \omega_{ci}) \approx \sqrt{2}k_{\parallel}v_{Ti}$  ( $\Delta R = \sqrt{2}k_{\parallel}v_{Ti}R_0/\omega \sim 8$  см), перекривається з областями альфвенівського резонансу (див. рис. 5), що призводить до зміни поляризації швидкої хвилі і її циклотронному поглинання іонами.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах [1, 5] та доповідались на конференціях [6, 10, 11].

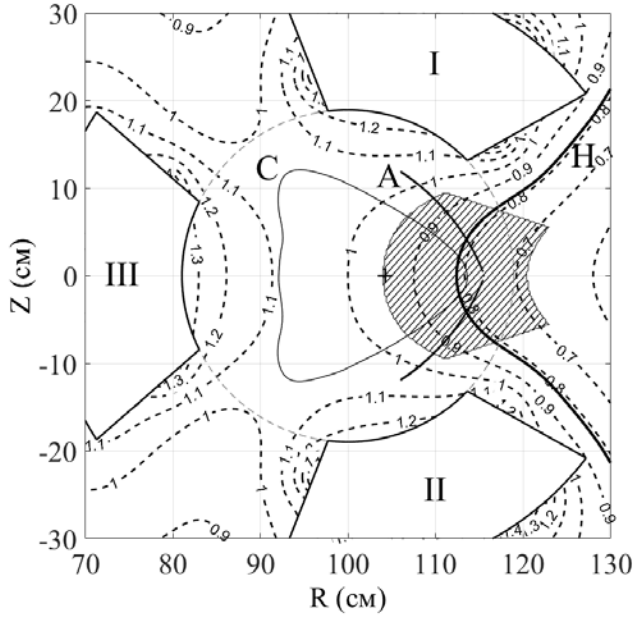


Рис. 4. Область циклотронного резонансу заштрихована; С – остання замкнена магнітна поверхня, А – схематичне відображення ТНВА, Н – іонний циклотронний резонанс, пунктирні лінії – нормований модуль напруженості магнітного поля; I-III – гвинтові провідники.

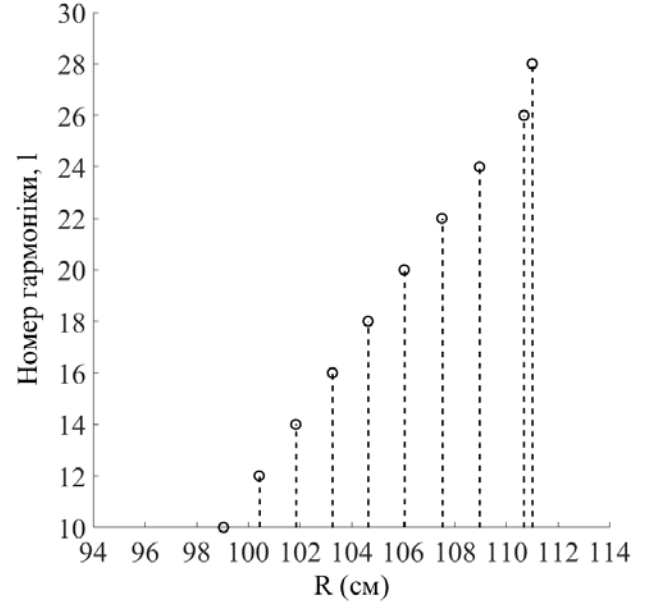


Рис. 5. Положення зон альфвенівського резонансу в екваторіальному перерізі тору для різних тороїдальних гармонік; центральна густина  $n_0 = 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

**Третій розділ** присвячено розробці та створенню ітераційних алгоритмів чисельного розв'язання як лінійних, так і нелінійних інтегральних рівнянь з особливістю в точці верхньої межі інтегрування шляхом побудови послідовних наближень і використання квадратурних формул для обчислення значень інтеграла на кожному проміжку інтегрування. Розроблені алгоритми застосовано автором для розв'язання інтегральних рівнянь, подібних до тих, що виникають при відновленні профілю густини плазми за даними рефлектометрії:

$$\sigma \int_0^x \frac{dx'}{\sqrt{\omega_i^2 - n(x')}} = \Phi_{(I)}(\omega_i), \quad (1)$$

$$\tau \int_0^x \frac{G(x') dx'}{\sqrt{\omega_i^2 - n(x') - \omega_i b(x')}} = \Phi_{(II)}(\omega_i), \quad (2)$$

де  $\sigma$ ,  $\tau$  – відомі константи,  $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_N$  – відомі вхідні данні,  $\Phi_{(I)}$  и  $\Phi_{(II)}$  – набори даних вимірювання,  $n(x')$ ,  $b(x')$  – функції, які потрібно винайти. Як приклад для розрахунків було обрано багатоканальну систему рефлектометрії з фіксованим набором частот. В силу того, що вихідні дані є дискретними, перед відновленням

шуваної функції, було проведено попередню процедуру інтерполяції даних за допомогою кубічного сплайна або за методом найменших квадратів. На рис. 6 зображено помилки відновлення модельних профілів густини плазми в залежності від величини помилки вихідних даних для серії розрахунків. Показано, що чисельний метод є стійким по відношенню до зашумлених вхідних даних і може ефективно використовуватися для відновлення параметрів плазми за даними як багатоканальної вузькосмугової системи, так і широкосмугової системи рефлектометрії зі змінною частотою.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботі [2] та доповідались на конференціях [7, 8, 9].

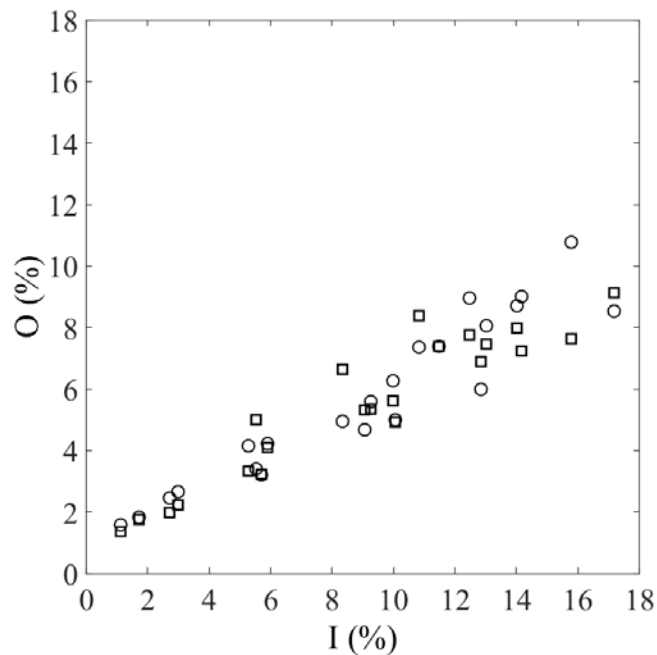


Рис. 6. Помилки відновлення профілю густини плазми в залежності від помилки вхідних даних, де  $I$  – стандартне відхилення вхідних даних,  $O$  – стандартне відхилення реконструйованого профілю густини плазми; квадрати – інтерполяція МНК, кола – інтерполяція кубічним сплайном.

**У четвертому розділі** представлено дослідження застосування двохполяризаційної рефлектометрії для визначення профілю густини плазми в торсатроні «Ураган-2М». Метод двохполяризаційної рефлектометрії передбачає одночасне використання як звичайної (О-) хвилі (з компонентою електричного поля, паралельною магнітному полю, яке утримує плазму), так і незвичайної (Х-) хвилі (з компонентою електричного поля перпендикулярною до магнітного поля, яке утримує плазму) при відновленні параметрів плазми за даними діагностики. При вирішенні даного завдання використовувався підхід, заснований на наближенні геометричної оптики. Дисперсійні рівняння для звичайної і незвичайної хвиль, використані в розрахунках зсуву фаз, описують строго перпендикулярне до магнітного поля поширення хвиль:

$$N_o(x, \omega) = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)^{1/2} \quad - \text{звичайна хвиля}, \quad (3)$$

$$N_x(x, \omega) = \left(\frac{(\omega^2 + \omega\omega_c - \omega_p^2)(\omega^2 - \omega\omega_c - \omega_p^2)}{\omega^2(\omega^2 - \omega_c^2 - \omega_p^2)}\right)^{1/2} \quad - \text{незвичайна хвиля}. \quad (4)$$

де  $\omega_p$  – плазмова частота,  $\omega_c$  – циклотронна частота електронів. Для розв’язання інтегральних рівнянь, що зв’язують зсуви фаз звичайної і незвичайної хвиль з набором зондуючих частот, використовувалися спеціальні ітераційні алгоритми, докладно описані в третьому розділі.

Магнітне поле торсатрона «Ураган-2М» (так само, як і інших стелараторів / торсатронів), на відміну від токамаків, створюється зовнішніми провідниками. Воно не залежить від параметрів плазми при характерних для сучасних експериментів величинах тиску плазми і вважається відомим. З цієї причини стає можливим застосування для відновлення профілю густини плазми незвичайної хвилі, поряд зі звичайною. В ході комп’ютерної симуляції двохполяризаційної рефлектометрії використовувалися параметри багатоканального рефлектометра з фіксованим набором частот. Використаний рефлектометр формує сітку з 18 частот в діапазоні 9.8 - 25.8 ГГц. «Сліпі» зони, які опиняються поза діапазонами зондування, мають такі розміри, що інтерполяція даних для них по суміжних частотах не призводить до суттєвих помилок вимірювання профілю густини плазми. Критичні густини, що відповідають обраному діапазону частот, змінюються від  $1.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при напруженості магнітного поля  $\sim 10 \text{ кГс}$ . При обчисленні похідних фазового зсуву по частоті використовувалося наближення  $d\varphi/d\omega \approx \Delta\varphi/\Delta\omega$ . Показано, що застосування фіксованого набору частот призводить до систематичних помилок у вимірах, не більших ніж 0.25% від вимірюваної величини. Це значно менше від помилки вимірювань, досягнутої в експериментах на сьогодні.

Числові розрахунки довели, що використання незвичайної хвилі в багатоканальному рефлектометрі з фіксованим набором частот істотно, в два рази, розширює діапазон вимірюваних густин. Так, для частоти 26 ГГц густина відбиваючого шару, для звичайної хвилі (умова відсічки  $\omega_p^2 = \omega^2$ ) дорівнює  $8.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , а для незвичайної хвилі становить (умова відсічки  $\omega_p^2 = \omega^2 + \omega\omega_c$ )  $17.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . На рис. 7 представлено результати відновлення модельного профілю густини плазми за допомогою О- та Х-хвилі.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботі [4] та доповідались на конференції [8].

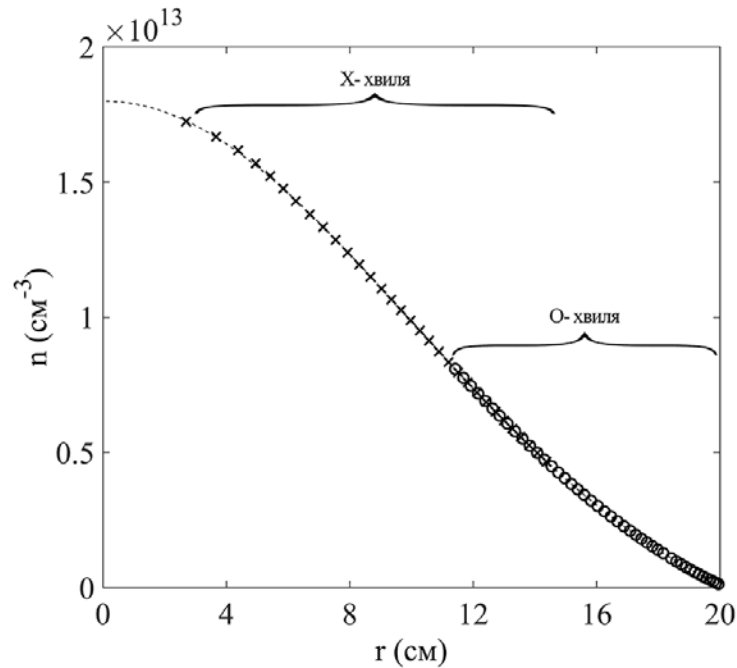


Рис. 7. Відновлення радіальної залежності густини плазми (суцільна лінія) за даними звичайної хвилі (кружки) і незвичайної хвилі (хрестики).

У п'ятому розділі наведено результати дослідження можливості використання двохполяризаційної рефлектометрії для відновлення профілю пологої магнітного поля (профілю омічного струму) в сферичних токамаках.

Для дослідження потенційних можливостей нового методу відновлення радіального профілю омічного струму в сферичних токамаках був обраний дванадцятиканальний вузькосмуговий рефлектометр с частотами  $f_i = \omega_i / 2\pi$  – 18, 24, 29, 34, 39, 45, 50, 54, 58, 62, 66 и 70 ГГц. Рефлектометр такого типу було встановлено на токамаці JET і використано для вимірювання електронного профілю густини плазми і флуктуацій<sup>2</sup>. При комп'ютерній симуляції задачі про відновлення профілю магнітного поля було обрано параметри, які відповідають сферичному токамаку MAST ( $a = 65$  см,  $R_0 = 85$  см,  $B_0 = 6 \cdot 10^3$  Гс,  $n_0 = 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $I = 1$  МА). Значення критичної густини, яке відповідає обраному діапазону частот, змінюється від  $0.01 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> до  $4.8 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. У розрахунках також передбачалося, що рефлектометр функціонує в режимі зміни частоти для кожного каналу, у вузькій смузі частот  $\Delta f = 500$  МГц. Модельний профіль густини плазми було обрано згідно формулі:

<sup>2</sup> The JET multichannel reflectometer / R. Prentice, A.E. Costley, J.A. Fessey, A.E. Hubbard // Proc. Course and Workshop "Basic and advanced diagnostic techniques for fusion plasmas" (Varenna, 1986). – 1986. – p. 451.

$$n(x) = \begin{cases} n_0 \frac{e^{\xi_1} - e^{A\xi_1\psi}}{e^{\xi_1} - 1}, & \psi \leq \psi_1 \\ n_p + (n_x - n_p)e^{(\psi_1 - \psi)/\Delta}, & \psi_2 \geq \psi > \psi_1 \\ n_b + (n_{02} - n_b) \frac{e^{\xi_2} - e^{\xi_2\psi^\gamma}}{e^{\xi_2} - 1}, & \psi > \psi_2 \end{cases} \quad (5)$$

де  $\psi = \psi(x)$  – позначка магнітної поверхні,  $n_0$  – центральна густина,  $n_b$  – гранична густина,  $n_p$  – густина на п'єдесталі,  $\xi_1, \xi_2, \Delta, A, \gamma$  – параметри, які визначають форму профілю. Моделювання профілю густини за допомогою такої формули дозволяє окремо варіювати як параметри основної частини, так і параметри п'єдесталу на межі плазми. Форма профілю, обчисленого за формулою (5), відповідає типовим розрядам Н-режиму в токамаці MAST<sup>3</sup>.

На рис. 8 зображено результат відновлення модельного профілю густини по фазовим зсувам звичайної хвилі, а на рис. 9 – результати відновлення профілю пологідалного магнітного поля для сферичного токамака.

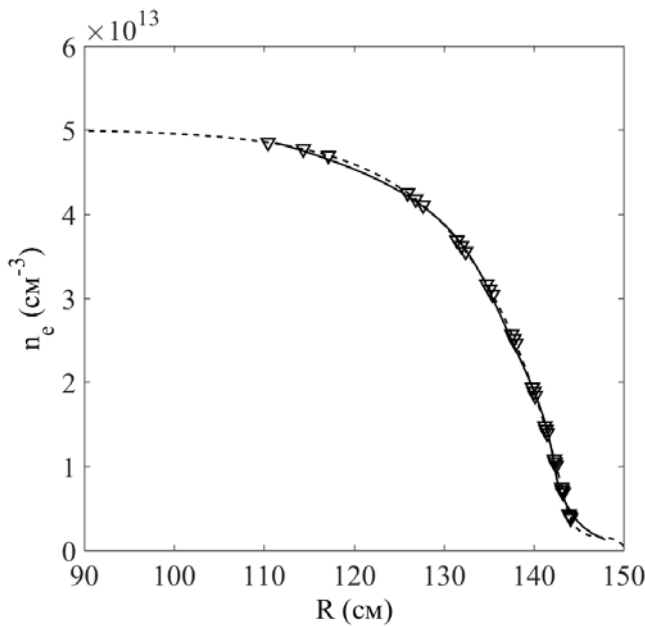


Рис. 8. Модельний (штрихована лінія) і реконструйований (суцільна лінія) профілі густини плазми за даними звичайної хвилі; трикутниками позначено точки відсічки з урахуванням крайніх точок співіювання  $f \pm \Delta f$ .

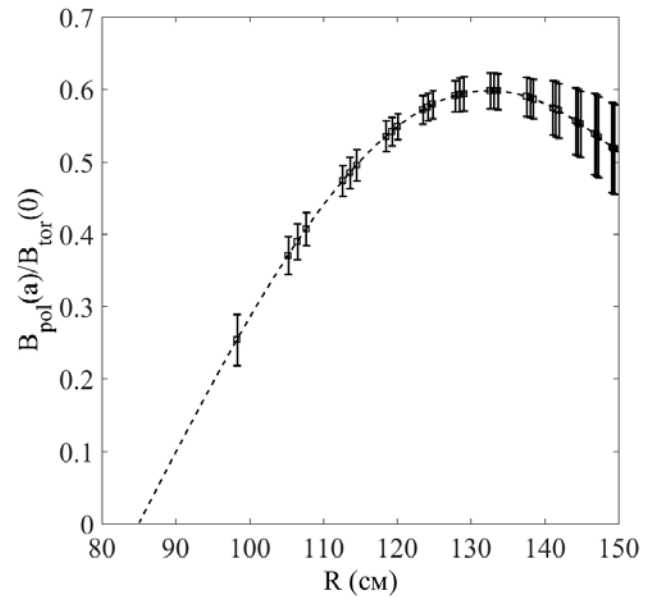


Рис. 9. Модельний профіль пологідалного магнітного поля (пунктирна лінія) і довірчий інтервал реконструйованого профілю пологідалного магнітного поля за даними незвичайної хвилі.

<sup>3</sup> L-H transition and pedestal studies on MAST / H. Meyer, et al. // Nuclear Fusion. – Vol. 51. – 2011. – 113011.

В ході чисельного моделювання було показано, що двохполяризаційна рефлектометрія із застосуванням звичайної і незвичайної хвиль може ефективно використовуватися для відновлення профілю магнітного поля в сферичних токамаках. Всі здобуті результати справедливі і для широкосмужової системи рефлектометрії зі зміною частоти.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботі [3] та доповідались на конференції [7].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана важлива наукова задача з'ясування впливу тривимірної неоднорідності параметрів плазми на розповсюдження і поглинання короткохвильових електромагнітних хвиль в плазмі торсатрона «Ураган-3М» та розробки нових методів діагностики плазми високочастотними полями, заснованих на одночасному використанні звичайної та незвичайної хвиль.

Основні **результати** та **висновки**, що отримано в дисертаційній роботі, полягають в наступному.

1. Вперше показано визначальний вплив тривимірної неоднорідності параметрів плазми торсатрона «Ураган-3М» на поширення та поглинання швидкої хвилі в іонно-циклотронному діапазоні частот. Встановлено, що просторова близькість зон альфвенівського і циклотронного резонансів приводить до зміни поляризації швидкої хвилі в області циклотронного резонансу. Наслідком цього є циклотронне поглинання швидкої хвилі на іонах, що підтверджено експериментально. Розраховано просторові зони розповсюдження швидкої хвилі та зони альфвенівського резонансу в тривимірній геометрії торсатрона для реального профілю густини плазми. З'ясовано, що з ростом густини плазми відбувається зсув зони альфвенівського резонансу для найбільш ефективно збуджуваних гармонік в область плазми з меншою густиною. Це знижує ефективність нагріву і обмежує максимальну густину плазми, створюваної цим високочастотним методом нагріву. Результати теоретичного дослідження використано для аналізу даних експериментів, що проводилися на тороїдальній установці «Ураган-3М».

2. Побудована якісна тривимірна картина поширення повільної хвилі, що збуджується рамковою антеною, в плазмі торсатрона «Ураган-3М» в іонному циклотронному діапазоні частот за допомогою розробленого автором модульного променевого коду *RayU3*. З'ясовано, що повільна хвиля поширюється тільки на периферії плазмового шнура торсатрона «Ураган-3М». Показано, що вся потужність, яку випромінює рамкова антена за допомогою повільної хвилі, поглинається поблизу антени за рахунок поглинання Ландау на електронах та за рахунок зіткнень. Також з'ясовано, що з ростом граничної густини плазми область поглинання повільної хвилі зсувається в сторону менших густин. Результати цього теоретичного дослідження було використано для аналізу даних експериментів, що проводилися на тороїдальній установці «Ураган-3М».

3. Розроблено спеціальні ітераційні алгоритми чисельного розв'язання інтегральних рівнянь, які пов'язують зсуви фаз зондуючих плазму звичайної і

незвичайної хвиль з просторовими розподілами параметрів плазми. Показано, що розроблені алгоритми є стійкими по відношенню до зашумлених вхідних даних і можуть ефективно застосовуватися для відновлення параметрів плазми за даними як багатоканальної вузькосмугової системи, так і широкосмугової системи рефлектометрії зі зміною частоти.

4. Вперше досліджено застосування двохполяризаційної рефлектометрії для визначення профілю густини плазми в торсатроні «Ураган-2М», яке передбачає одночасне використання звичайної і незвичайної хвиль. Показано, що використання незвичайної хвилі для зондування плазми істотно розширює діапазон вимірюваних густин для багатоканального рефлектометра з фіксованим набором частот.

5. Вперше запропоновано та теоретично обґрунтовано новий метод вимірювання профілю полоїдального магнітного поля (профілю омічного струму) в сферичних токамаках, в якому для зондування плазми одночасно використовуються як звичайна, так і незвичайна хвилі. Запропонований метод передбачає використання вже існуючих систем рефлектометрії та забезпечує можливість отримання нових даних при найменших затратах. Результати застосування методу справедливі як для багатоканальної вузькосмугової системи, так і для широкосмугової системи рефлектометрії зі зміною частоти.

## СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Characteristic properties of the three-half-turn-antenna-driven RF discharge in the Uragan-3M torsatron / L.I. Grigor'eva, V.V. Chechkin, V.E. Moiseenko, et al. // *Plasma Physics Reports*. – 2015. – V. 41, № 12. – P. 1002-1015.
2. Tretiak K.K. Iterative algorithms for processing experimental data / K.K. Tretiak // *Plasma Physics Reports*. – 2016. – V. 42, № 10. – P. 947-955.
3. Grekov D.L. Investigation of dual polarization reflectometry for determination of plasma density and magnetic field in a spherical tokamak / D.L. Grekov, K.K. Tretiak // *Journal of Fusion Energy*. – 2016. – P. 1-8. doi: 10.1007/s10894-016-0114-x.
4. Греков Д.Л. Разработка комплекса двухполяризационной рефлектометрии торсатрона Ураган-2М / Д.Л. Греков, К.К. Третьяк, В.В. Филиппов // *Журнал Технической Физики*. – 2016. – Т. 86, № 12. – С. 60-68.
5. Tretiak K.K. Ray tracing analysis of slow wave heating in the ion cyclotron range of frequencies in Uragan-3M torsatron / K.K. Tretiak, D.L. Grekov // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics (106)*. – 2016. – №6. – P. 84-87.
6. Греков Д.Л. Деякі особливості високочастотного нагрівання плазми в торсатроні Ураган-3М / Д.Л. Греков, В.В. Немов, К.К. Третьяк // *Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу: Програма, збірник анотацій, список учасників*. – Київ, 2013. – С. 27.
7. Grekov D.L. Microwave dual-polarization diagnostics in toroidal plasma / D.L. Grekov, K.K. Tretiak, V.V. Filippov // *Plasma Physics and Technology*. – 2014. – Vol. 1, № 2. – P. 108, ISSN: 2336-2626.



8. Grekov D.L. Dual-polarization microwave reflectometry in Uragan-2M: Theoretical maintenance / D.L. Grekov, K.K. Tretiak, V.V. Filippov // International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, September 15-18, 2014: Book of Abstracts. – Kharkiv, Ukraine, 2014. – P. 29.

9. Третяк К.К. Комплекс двохполяризаційної рефлектومتрії торсатрону У-2М з використанням фіксованого набору частот / К.К. Третяк, Д.Л. Греков, В.В. Філіппов // Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу: Програма, збірник анотацій, список учасників. – Київ, 2015. – С. 26.

10. Tretiak K.K. Theoretical studies of slow wave plasma heating in Uragan-3M torsatron / K.K. Tretiak, D.L. Grekov // 13<sup>th</sup> Kudowa Summer School “Towards Fusion Energy”, June 13-17, 2016: Program & Contributions. – Kudowa-Zdrój, Poland, 2016. – P. 107.

11. Tretiak K.K. Theoretical studies of slow wave plasma heating in Uragan-3M torsatron / K.K. Tretiak, D.L. Grekov // International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, September 12-15, 2016: Book of Abstracts. – Kharkiv, Ukraine, 2016. – P. 75.

## АНОТАЦІЯ

Третяк К.К. «Нагрів і діагностика плазми тороїдальних пасток короткохвильовими високочастотними полями». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.08. – Фізика плазми. – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна МОН України. – Харків, 2017.

У дисертації досліджено особливості розподілу високочастотних електромагнітних полів в неоднорідній тороїдальній плазмі в області іонних циклотронних частот, а також досліджено нові методи діагностики плазми, засновані на двохполяризаційній рефлектومتрії, які можуть бути використані як в стелараторах, так і в сферичних торах.

Проведено теоретичне дослідження високочастотного нагріву неоднорідної плазми торсатрона «Ураган-3М» швидкими магнітозвукових хвилями. Вперше показано визначальний вплив тривимірної неоднорідності параметрів плазми торсатрона «Ураган-3М» на поширення і поглинання швидкої хвилі. Встановлено, що просторова близькість зон альфвенівського і циклотронного резонансів приводить до зміни поляризації швидкої хвилі в області циклотронного резонансу. Наслідком цього є циклотронне поглинання швидкої хвилі на іонах. За допомогою променевого коду побудована якісна тривимірна картина поширення повільної хвилі. Вперше з'ясовано, що повільна хвиля поширюється тільки на периферії плазмового шнура торсатрона «Ураган-3М» і поглинається поблизу антени за рахунок загасання Ландау на електронах і загасання за рахунок зіткнень.

Досліджено можливість застосування двохполяризаційної рефлектومتрії для визначення профілю густини плазми в торсатроні «Ураган-2М». Запропоновано та досліджено новий метод вимірювання профілю полоїдального магнітного поля

в сферичних токамаках, в якому для зондування плазми одночасно використовуються як звичайна, так і незвичайна хвилі.

Ключові слова: високочастотний нагрів, метод геометричної оптики, неоднорідна плазма, двохполяризаційна рефлектометрія, звичайна хвиля, незвичайна хвиля, сферичні тори.

### АННОТАЦИЯ

Третьяк К.К. «Нагрев и диагностика плазмы тороидальных ловушек коротковолновыми высокочастотными полями». – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08. – Физика плазмы. – Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина МОН Украины, Харьков, 2017.

В диссертации исследованы особенности распределения высокочастотных электромагнитных полей в неоднородной тороидальной плазме в области ионных циклотронных частот, а также исследованы новые методы диагностики плазмы, основанные на двухполяризационной рефлектометрии, которые могут быть использованы как в стеллараторах, так и в сферических торах.

Проведено теоретическое исследование высокочастотного нагрева неоднородной плазмы торсатрона «Ураган-3М» быстрыми магнитозвуковыми волнами, которые возбуждаются трехполувитковой антенной. Впервые показано определяющее влияние трехмерной неоднородности параметров плазмы торсатрона «Ураган-3М» на распространение и поглощение быстрой волны. Установлено, что пространственная близость зон альфвеновского и циклотронного резонансов приводит к изменению поляризации быстрой волны в области циклотронного резонанса. Следствием этого является циклотронное поглощение быстрой волны на ионах, что подтверждено экспериментально. С помощью лучевого кода построена качественная трехмерная картина распространения медленной волны, возбуждаемой рамочной антенной, в плазме торсатрона «Ураган-3М». Впервые выяснено, что медленная волна распространяется только на периферии плазменного шнура торсатрона «Ураган-3М» и слабо проникает вглубь плазмы. Установлено, что вся мощность, излучаемая рамочной антенной посредством медленной волны, поглощается вблизи антенны за счет затухания Ландау на электронах, а в плазме с невысокой плотностью и низкой температурой важную роль в поглощении медленной волны играют парные столкновения.

Разработаны специальные итерационные алгоритмы численного решения интегральных уравнений, которые связывают сдвиги фаз зондирующих плазму обыкновенной и необыкновенной волн с пространственными распределениями параметров плазмы. Тестирование разработанных алгоритмов восстановления параметров плазмы по данным набегов фазы обыкновенной и необыкновенной волн показало их эффективную работу и устойчивость к случайным и систематическим ошибкам измерений. Исследована возможность применения двухполяризационной рефлектометрии для определения профиля плотности плазмы в торсатроне «Ураган-2М». Показано, что использование такого метода существенно расширяет диапазон измеряемых плотностей при использовании

многоканального рефлектометра с фиксированным набором частот. Предложен и исследован новый метод измерения профиля полоидального магнитного поля в сферических токамаках, в котором для зондирования плазмы одновременно используются как обыкновенная, так и необыкновенная волны. Предложенный метод является одним из немногих вариантов восстановления профиля полоидального магнитного поля, который предполагает эффективное использование уже существующих систем рефлектометрии.

Ключевые слова: высокочастотный нагрев, метод геометрической оптики, неоднородная плазма, двухполяризационная рефлектометрия, обыкновенная волна, необыкновенная волна, сферические торы.

### ABSTRACT

Tretiak K.K. "High-frequency short wavelength plasma heating and diagnostics in toroidal traps". – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences by specialty 01.04.08. – Plasma physics. – V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2017.

This thesis deals with investigation of high frequency electromagnetic fields distribution features in inhomogeneous toroidal plasma in the ion cyclotron range of frequencies and with exploring of new plasma diagnostic methods, based on dual-polarization reflectometry. These methods are usable both in stellarators and spherical tori. Theoretical research of high frequency fast wave heating in torsatron "Uragan-3M" inhomogeneous plasma was performed. The decisive influence of three-dimensional inhomogeneity plasma parameters of "Uragan-3M" torsatron on fast wave propagation and absorption is shown for the first time. The features of slow wave propagation and absorption in ICRF in the toroidal non-uniform plasma were investigated by ray tracing technique. It was revealed that this wave penetrates poorly into the plasma core and heats the plasma periphery above all. All the radiated power is absorbed near the antenna region due to Landau damping and collisional damping.

Special iterative algorithms for integral equations solving are developed. These integral equations connect phase shifts of ordinary and extraordinary waves with a spatial distribution of plasma parameters. The possibility of using dual polarization reflectometry for "Uragan-2M" torsatron density profile measurement is investigated. Finally the new effective method for poloidal magnetic field profile reconstruction in the spherical tokamaks is presented.

Keywords: high frequency heating, method of geometrical optics, non-uniform plasma, dual-polarization reflectometry, ordinary wave, extraordinary wave, spherical tori.